Iranian Food Science and Technology
Research Journal
Homepage: https://ifstrj.um.ac.ir

Review Article
Vol. 20, No. 1, Mar.-Apr., 2024, p. 165-181

A Review of the Use of Microscopic Algae as Biological Sensors for Identifying Environmental Pollutants and Smart Packaging of Food Materials

B. Nowruzi [1*]

1- Assisstant Professor, Department of Biotechnology, Faculty of Converging Sciences and Technologies, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran
(*- Corresponding Author Email: bahareh.nowruzi@srbiau.ac.ir)

Dates	How to cite this article:
Received: 20.04.2023 Revised: 05.08.2023 Accepted: 10.08.2023 Available Online: 12.08.2023	Nowruzi, B. (2024). A review of the use of microscopic algae as biological sensors for identifying environmental pollutants and smart packaging of food materials. *Iranian Food Science and Technology Research Journal, 20*(1), 165-181. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/ifstrj.2023.81939.1250

Introduction

Intelligent food packaging as a new technology can maintain the quality and safety of food during its shelf life. This technology uses indicators and sensors that are used in packaging and detects physiological changes in food (due to microbial and chemical degradation). These indicators usually provide information that can be easily identified by the food distributor and the consumer. However, most of the markers currently used are non-renewable and non-degradable synthetic materials. Microalgae that live in both marine and freshwater are a versatile solution for building new biosensors to detect pollutants such as herbicides or heavy metals. These photosynthetic microorganisms are very sensitive to their environmental changes and allow the detection of pollutants. In the past few years, several studies have been conducted in relation to the development, evaluation and application of biosensors using natural compounds in smart food packaging, and some of them are reported and summarized in Table 2.

Materials and Methods

In these studies, examples are mainly focused on biosensors related to biopolymers, but some other synthetic polymers that are easily degraded have also been used as examples. In Table 2, it is also specified what the function and application of the sensor is and how it reacts to the loss of freshness of food. Most sensors are sensitive to the change in pH caused by the release of volatile nitrogen compounds, and this change is characterized by a colorimetric response. Sensors are usually placed in the space above the food container, avoiding direct contact with the food, but close enough to detect changes in the environment and respond to changes in food quality. When these biosensors are integrated with biopolymers, they are usually incorporated into the polymer structure, and the color change of the layers (film) indicates changes in food quality in the packed product. The collected information also clearly shows that extracts rich in chemical compounds of pigments that change color with pH and especially anthocyanins have been used in these biosensors. In addition, most studies of biosensors have been conducted on fish, meat, and seafood, which is probably because their quality degradation is an important economic loss and also because the pH of the surrounding environment is changed during the degradation process. , and this change is easily detected through pH-sensitive biosensors. Smart food packaging technology has made it possible to monitor food quality by incorporating markers, sensors and radio frequency identification (RFID) into packaging. The technology also allows producers and consumers to trace the history of a product through important points in the food supply chain.Interestingly, some compounds applied and tested in the sensor

https://doi.org/10.22067/ifstrj.2023.81939.1250

not only provide a pH-sensitive dye, but also have other bioactive properties, for example, antimicrobial properties, and its presence in the polymer matrix can also increase the storage activity of packaging materials.

Results and Discussion

This paper shows that microalgae can be used as biosensors to detect pollutants such as herbicides, heavy metals and volatile organic compounds. These biosensors are very sensitive and reproducible for physical or chemical analysis. One of the main advantages of these microalgal biosensors is that repeated measurements can be performed without extensive sample preparation. They can also be selective, for example chlorophyll fluorescence emitted from photosynthetic activity allows the detection of herbicides, while inhibition of alkaline phosphatase and esterase allows the determination of heavy metals and organophosphate insecticides. Recently, great progress has been made in the identification of genes and related pathways in microalgae, and powerful techniques for genetic engineering have been developed. Collectively, the progress achieved in these areas will rapidly increase our ability to genetically optimize the production of more sensitive microalgae-based biosensors.

Keywords: Biosensors, Food preservation, Freshness of food, Microalgae, Smart packaging

نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
https://ifstrj.um.ac.ir

مقاله مروری

جلد ۲۰، شماره ۱، فروردین-اردیبهشت ۱۴۰۳، ص. ۱۸۱-۱۶۵

"مروری بر استفاده از ریز جلبک‌ها به‌عنوان حسگرهای زیستی برای شناسایی آلاینده‌های زیست‌محیطی و بسته‌بندی‌های هوشمند مواد غذایی"

بهاره نوروزی [۱*]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۳۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۱۹

چکیده

بسته‌بندی هوشمند مواد غذایی به‌عنوان یک فناوری جدید می‌تواند کیفیت و ایمنی مواد غذایی را در طول زمان ماندگاری حفظ کند. این فناوری از حسگرهایی استفاده می‌کندکه در بسته‌بندی بکار رفته و تغییرات فیزیولوژیکی مواد غذایی (به‌دلیل تخریب میکروبی و شیمیایی) را تشخیص می‌دهد. این حسگرها، معمولاً اطلاعاتی را ارائه می‌دهند که به راحتی توسط توزیع‌کننده مواد غذایی و مصرف‌کننده قابل شناسایی است. با این حال، بیشتر حسگرهایی که در حال حاضر مورد استفاده قرار می‌گیرند، مواد مصنوعی تجزیه‌ناپذیر هستند. ریز جلبک‌هایی که در آب‌های دریایی و شیرین زندگی می‌کنند، راه‌حلی همه کاره برای ساخت حسگرهای زیستی جدید برای تشخیص آلاینده‌ها مانند علف‌کش‌ها یا فلزات سنگین هستند. این میکروارگانیسم‌های فتوسنتزی به تغییرات محیطی خود بسیار حساس هستند و امکان تشخیص آلاینده‌ها را فراهم می‌کنند. بنابراین، این مقاله با هدف بازنگری آخرین اطلاعات در مورد حسگرهای زیستی، براساس ترکیبات به‌دست آمده از عصاره‌های ریز جلبکی است که می‌توانند در ارتباط با پلیمرهای زیستی، به‌عنوان بسته‌بندی هوشمند مواد غذایی عمل کنند. با این حال، هنوز محدودیت‌هایی وجود دارد که باید قبل از اینکه این فناوری به مرحله بالغ تجاری برسد، بر آن غلبه کرد.

واژه‌های کلیدی: بسته‌بندی هوشمند، تازگی مواد غذایی، حسگرهای زیستی، ریز جلبک‌ها، ماندگاری مواد غذایی

مقدمه

در سال‌های اخیر شاهد حوادث متعددی از آلودگی محصولات غذایی در سراسر جهان بوده‌ایم. تقاضای رو به رشد مصرف‌کنندگان برای توسعه فناوری وجود دارد. برای اطمینان از ایمنی محولات غذایی، کیفیت غذا معمولاً توسط محیطهایی که محصولات در آن بسته‌بندی و به مصرف‌کنندگان تحویل داده می‌شوند، تعیین می‌شود. در این مدت ممکن است هر اتفاقی رخ دهد که بر کیفیت محصولات تأثیر منفی می گذارد (Yam, Takhistov, & Miltz, 2005). برخی از شاخص‌های ابتدایی مانند بو، رنگ و بافت می‌توانند توسط مصرف‌کنندگان برای تعیین کیفیت محصولات استفاده شوند. بنابراین، تلاش‌هایی برای توسعه مواد بسته‌بندی هوشمند صورت گرفته است که می‌تواند به‌عنوان ابزاری دقیق برای نشان دادن کیفیت محصولات غذایی عمل کند. اکثر مواد دارای بسته‌بندی هوشمند، از حسگرها در بسته‌بندی‌های معمولی استفاده می‌کنند (Halonen *et al*., 2020).

آلودگی آب ناشی از صنعت و کشاورزی به یک مشکل بزرگ در کشورهای در حال توسعه تبدیل شده است، در کشورهای توسعه نیافته نزدیک به ۵۰۰ میلیون نفر به آب آشامیدنی سالم دسترسی ندارند. هدف تمام فرآیندهای تصفیه آب حذف آلاینده‌های موجود یا حداقل کاهش غلظت آن‌ها است، تا آب برای استفاده نهایی مطلوب خود مناسب شود. بنابراین امروزه بسیار مهم است که بتوانیم ماهیت و مقدار آلاینده‌ها در

۱- استادیار گروه بیوتکنولوژی، دانشکده علوم و فناوری‌های همگرا، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: bahareh.nowruzi@srbiau.ac.ir)

https://doi.org/10.22067/ifstrj.2023.81939.1250

محیط را خود کنترل کنیم. در حال حاضر دو رویکرد تحلیلی کلی برای این منظور استفاده می‌شود. آن‌ها براساس آنالیزهای فیزیکی و شیمیایی مرسوم یا براساس سنجش‌های بیولوژیکی قابل سنجش هستند. اگرچه تکنیک‌های تحلیلی استاندارد، تشخیص و تعیین کمی آلاینده‌های خاص را امکان‌پذیر می‌سازند، بسیار پیچیده و پرهزینه هم هستند. علاوه بر این، آن‌ها نمی‌توانند داده‌هایی در مورد فراهم‌سازی زیستی آلاینده‌ها و اثرات آن‌ها بر سیستم‌های زنده ارائه دهند (Aydınoğlu, 2020).

حسگرهای زیستی از طریق تشخیص هدف‌های خاص با تبدیل سیگنال‌های به‌دست آمده به سیگنال‌های متناسب برای تجزیه و تحلیل بیشتر عمل می‌کنند. یک حسگر زیستی کاملاً کاربردی از یک عنصر تشخیص، مبدل‌ها (الکتروشیمیایی، کالری‌سنجی، نوری و تغییر جرم) و یک سیستم الکترونیکی (شامل تقویت‌کننده سیگنال، پردازنده و نمایش داده) تشکیل شده است. با توجه به اهمیت بیولوژیکی جلبک‌ها، طراحی حسگرهای زیستی با استفاده از سلول‌های جلبکی برای رفع محدودیت‌های روش‌های زیست تحلیلی فعلی از نظر حساسیت، توان عملیاتی، سهولت استفاده پدید آمده است. در این سیستم‌ها، ترکیبات سمی محیطی را می‌توان از طریق نظارت بر سیگنال‌های بیوالکتروشیمیایی تولید شده توسط سلول‌های جلبکی به‌عنوان عناصر حسگر زیستی شناسایی کرد. حسگرهای زیستی مبتنی بر جلبک‌ها، ابزارهای جذابی برای تشخیص آنالیت‌های زیست‌محیطی و امنیتی به روشی حساس، طولانی‌مدت و ترکیبی هستند. از این رو، چندین حسگر زیستی جلبکی در دهه گذشته برای شناسایی فلزات سنگین، آفت‌کش‌ها و ترکیبات آلی فرار ایجاد شده‌اند که با حساسیت بالا، سهولت دستکاری ژنتیکی، پایداری و انعطاف‌پذیری، نسل جدیدی از حسگرها را فراهم می‌کنند (جدول ۱). این دستگاه‌های میکروالکترونیکی امکان تشخیص سریع و دقیق انواع مواد موجود در مایعات بدن، آب یا هوا را فراهم می کنند. نیاز به روش‌های هشدار اولیه برای شناسایی آلاینده‌ها باعث توسعه حسگرهای مبتنی بر سلول شده است. ارزیابی سریع و دقیق سمیت آب امروزه یک موضوع مهم برای ایمنی آب محیطی است. با این حال، اندازه‌گیری سمیت هر یک از مواد شیمیایی موجود در آب دشوار است، زیرا طیف گسترده‌ای از مواد شیمیایی در آب وجود دارند (Ejeian *et al*., 2018).

حسگرهای زیستی، یکی از مفیدترین روش‌های اندازه‌گیری سمیت در فاضلاب‌های محیطی و صنعتی می‌باشند. بسیاری از زیست‌سنجی ها براساس جلبک‌ها، باکتری‌ها، بافت‌های گیاهی و سلول‌های حیوانی در سال‌های اخیر توسعه یافته‌اند. به‌طور خاص، ریز جلبک‌ها به‌دلیل حساسیت و تکرارپذیری بالا به‌طور گسترده‌ای برای سنجش سمیت استفاده می‌شوند. استفاده از ریز جلبک‌ها در طراحی حسگرهای زیستی، در بیوتکنولوژی بسیار جدید است. چندین حسگر زیستی جلبکی در طول دهه گذشته به‌منظور شناسایی علف‌کش‌ها، ترکیبات آلی فرار (VOC)[1]، فلزات سنگین و حتی شناسایی ترکیبات حاصل از جنگ‌های شیمیایی توسعه یافته‌اند. در حسگرهای زیستی ریزجلبکی، فعالیت متابولیک موجود زنده اندازه‌گیری می‌شود. مواد سمی در محیط اطراف سلول‌ها تأثیر زیادی بر فعالیت متابولیک آن‌ها دارند و این اثر می‌تواند به سیگنال‌های الکتریکی یا نوری تبدیل شود (Poyatos-Racionero, Ros-Lis, Vivancos, & Martínez-Máñez, 2018). در جدول ۱، انواع حسگرهای زیستی ریز جلبکی، نوع آن و سویه‌های تولیدکننده آن ها آمده است.

در مقاله مروری حاضر هدف آن است که آخرین پیشرفت‌های حاصل شده در زمینه استفاده از ریز جلبک‌ها به‌عنوان حسگرهای زیستی برای شناسایی آلاینده‌هایی مانند علف‌کش‌ها، فلزات سنگین و ترکیبات آلی فرار مورد بررسی قرار گیرد، علاوه‌بر آن نقش آنها در بسته‌بندی هوشمند مواد غذایی نیز به تفسیر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

حسگرهای زیستی حاصل از ترکیبات طبیعی

رشد میکروارگانیسم‌ها در مواد غذایی یکی از دلایل تخریب مواد غذایی است که منجر به از بین رفتن تازگی آن با تولید متابولیت‌هایی می‌شود که با حسگرهای موجود در بسته‌بندی قابل تشخیص است. وجود یا تشکیل متابولیت‌هایی مانند ترکیبات نیتروژن فرار، دی اکسید کربن، آمین‌های بیوژنیک، اتانول یا ترکیبات گوگردی نمونه‌هایی هستند که از طریق حسگرهای تازگی قابل تشخیص هستند. گوشت، ماهی، غذاهای دریایی، میوه‌ها و سبزیجات محصولات فاسد شدنی هستند و اطمینان از کیفیت آن‌ها برای محافظت از مصرف‌کننده در برابر متابولیت‌های خطرناک تولید شده در طول فرآیند تخریب آن بسیار مهم است. تازگی گوشت با رشد میکروبی کاهش می‌یابد که منجر به تشکیل چندین ترکیب مانند اسید استیک، ان–بوتیرات و آمین‌های بیوژنیک می‌شود. تشکیل این ترکیبات کیفیت گوشت را به خطر می اندازد، بنابراین می‌توان از حسگر تازگی برای تشخیص آن‌ها استفاده کرد. در ماهی و غذاهای دریایی، فساد عمدتاً با مقدار کل نیتروژن بازی فرار (TVB-N)[2] و وجود آمین‌های بیوژنیک ناشی از دی کربوناسیون اسیدهای آمینه به دلیل عملکرد میکروبیولوژیکی، نشان داده می‌شود. علاوه بر این، تولید بخارات یا گازهایی مانند اتانول یا دی‌اکسید کربن (CO_2) تولید شده توسط میکروارگانیسم‌ها کیفیت غذا را کاهش می دهد. متابولیت‌های تولیدی را می‌توان توسط حسگرهای تازگی تشخیص داد (Azman, Khairul, & Sarbon, 2022).

1- Volatile organic compounds

2- The total amount of volatile nitrogen

جدول ۱- زیست حسگرهای ریز جلبکی
Table 1- Microalgae biosensors

سویه Strain	آلی/غیر آلی Inorganic/organic	نوع روش Method type	محدودیت شناسایی Detection limit	منبع References
Chlorella vulgaris در ژل آلجینات *Chlorella vulgaris* in alginate gel	آلی Organic	آمپرومتری	۲-۳۰۰۰ میکرومول بر کوبیک دسی‌متر 2–3000 µmol dm^{-3}	(Shitanda, Takada, Sakai, & Tatsuma, 2005)
Chlorella vulgaris	آلی Organic	آمپرومتری	۱ میکرومول بر کوبیک دسی‌متر 1 µmol dm^{-3}	(Allouzi *et al*., 2022)
Dictyosphaerium chlorelloides	غیر آلی Inorganic	نوری	۰/۵ میکرومول بر لیتر 0.5 µmol L^{-1}	(Altamirano *et al*., 2004)
Chlorella vulgaris در میکروستون های سیلیکایی *Chlorella vulgaris* in silica micro-columns	غیر آلی Inorganic	رقت‌سازی‌های متوالی و هدایت‌سنجی	۰/۵ -۴ میکروگرم بر لیتر 0.5–4 µg L^{-1}	(Tajes-Martinez, Beceiro-Gonzalez, Muniategui-Lorenzo, & Prada-Rodriguez, 2006)
Chlorella vulgaris بین دو الکترود پلاتینوم *Chlorella vulgaris* between two platinum electrodes	غیر آلی Inorganic	هدایت‌سنجی	۱۰ppb 10 ppb	(Guedri & Durrieu, 2008)
تثبیت *Chlorella vulgaris* در سرم بوین آلبومین *Chlorella vulgaris* immobilized in BSA	غیر آلی Inorganic	نوری	۱ppb 1 ppb	(Chouteau, Dzyadevych, Chovelon, & Durrieu, 2004; Claude Durrieu & Tran-Minh, 2002)
Dictyosphaerium chlorelloides در ماتریکس سیلیکای سل-ژل *Dictyosphaerium chlorelloides* in sol-gel silica matrix	غیر آلی Inorganic	نوری	۰/۶ میلی‌گرم بر لیتر 0.6 mg L^{-1}	(Peña-Vázquez, Pérez-Conde, Costas, & Moreno-Bondi, 2010)
تثبیت *Synechococcus* PCC 7942 شده در پلی‌ونیل الکل *Synechococcus* PCC 7942 immobilized in PVA	غیر آلی/آلی Inorganic/organic	نوری	۰/۲ و ۰/۰۶ میلی‌مولار بر لیتر 0.2 and 0.06 mmol L^{-1}	(Rahman *et al*., 2011)
Synechococcus	غیر آلی Inorganic	نوری	کمتر از ۵ میلی‌گرم بر لیتر <5 mg L^{-1}	(Rathnayake, Munagamage, Pathirathne, & Megharaj, 2021)
Anabaena torulosa تثبیت شده روی الکترود اکسیژن *Anabaena torulosa* immobilized on an oxygen electrode	غیر آلی Inorganic	آپرومتری	۰/۴ میلی‌گرم بر لیتر 0.4 mg L^{-1}	(Verma, Kaur, & Kumar, 2011)
Thalassiosira rotula	آلی Organic	نوری	۱۰ppb 10 ppm	(De Stefano, Rendina, De Stefano, Bismuto, & Maddalena, 2005b; Verma *et al*., 2011)

در چند سال گذشته مطالعات متعددی در رابطه با توسعه، ارزیابی و کاربرد حسگرهای زیستی با استفاده از ترکیبات طبیعی در بسته‌بندی هوشمند مواد غذایی انجام شده است و برخی از آن‌ها در جدول ۲ گزارش و خلاصه شده‌اند. در این مطالعات، نمونه‌ها عمدتاً بر روی حسگرهای زیستی مرتبط با پلیمرهای زیستی متمرکز بوده، اما برخی دیگر از پلیمرهای مصنوعی که به راحتی تجزیه می‌شوند، نیز به‌عنوان نمونه بکار رفته است. در جدول ۲ همچنین مشخص شده که عملکرد و کاربرد حسگرچیست و چگونه به از بین رفتن تازگی غذا واکنش نشان می‌دهد (Hemavathi & Siddaramaiah, 2018).

بیشتر حسگرها به تغییر pH ناشی از انتشار ترکیبات نیتروژن فرار حساس هستند، و این تغییر با یک پاسخ رنگ‌سنجی[1] مشخص می گردد. حسگرها در فضای بالای ظرف غذا (عدم تماس مستقیم با غذا) قرار می‌گیرند، و به اندازه کافی نزدیک سطح غذا هستند تا تغییرات محیط را تشخیص دهند و به تغییرات کیفیت غذا پاسخ دهند. هنگامی

1- Colorimetric response

که این حسگرهای زیستی با پلیمرهای زیستی ادغام می‌شوند، معمولاً در ساختار پلیمری گنجانده می‌شوند و تغییر رنگ لایه‌ها (فیلم)، نشانگر تغییرات کیفیت مواد غذایی در محصول بسته‌بندی است. اطلاعات جمع آوری شده همچنین به وضوح نشان می‌دهد، که عصاره‌های غنی از ترکیبات شیمیایی رنگدانه‌ها که با pH تغییر رنگ می‌دهند و به ویژه آنتوسیانین‌ها در این حسگرهای زیستی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. (Sobhan, Muthukumarappan, & Wei, 2021).

علاوه بر این، بیشتر مطالعات حسگرهای زیستی روی ماهی، گوشت و غذاهای دریایی صورت گرفته، که احتمالاً به این دلیل است که کاهش کیفیت آن‌ها یک ضرر اقتصادی مهم بوده و همچنین در فرآیند تخریب، pH محیط اطراف تغییر کرده، و این تغییر به راحتی از طریق حسگرهای زیستی حساس به pH شناسایی می‌شود. (Mallick, 2002).

جالب توجه است که برخی از ترکیبات اعمال شده و آزمایش شده در حسگر، نه تنها رنگ حساس به pH را ارائه می‌دهند، بلکه دارای خواص زیست فعال دیگری نیز هستند، به‌عنوان مثال، خواص ضدمیکروبی و حضور آن در ماتریکس پلیمری نیز می‌تواند فعالیت نگهداری مواد بسته‌بندی را افزایش دهد. در طول فساد، گازهای فرار متفاوتی در طول زمان آزاد می‌شوند که یکی از آن‌ها ترکیبات نیتروژنی فرار است. متابولیسم میکروبی پروتئین‌ها، رایج‌ترین اشکال یافت شده آمونیاک، دی متیل آمین وتری متیل آمین هستند که در مجموع به عنوان TVB-N شناخته می‌شوند. روش تشخیص TVB-N نیازمند کار آزمایشگاهی گسترده‌ای است که شامل استخراج و تیتراسیون بازهای فرار است (Monique, 2015). بنابراین، ممکن است با ایجاد یک حسگر یا شاخص زیستی که بتواند TVBN را تشخیص دهد، سودمند باشد. برخلاف سایر متابولیت‌ها که فقط برای پارامترهای نشان دهنده کیفیت قابل استفاده هستند، آمین‌های بیوژنیک دارای اثرات سمی در موجودات هستند. مقدار آمین‌های بیوژنیک می‌تواند در طول فساد مواد غذایی و فرآیند تخمیر میکروبی افزایش یابد (Ladero, Calles-Enríquez, Fernández, & A Alvarez, 2010). آمین‌های بیوژنیک معمولاً از کربوکسیلاسیون اسیدهای آمینه آزاد یا آمیناسیون و ترانس‌آمیناسیون آلدهیدها و کتون‌ها تولید می‌شوند. نظارت بر سطوح آمین‌های بیوژنیک در غذاها و نوشیدنی‌های تازه و فرآوری شده نه تنها به دلیل خطرات سمی آن‌ها، بلکه به دلیل سودمندی آن‌ها به‌عنوان شاخصی از فعالیت میکروبی نامطلوب در مواد غذایی تخمیر نشده، مانند فرآورده‌های گوشتی تازه و پخته شده، بسیار مورد توجه است. چندین حسگر زیستی مبتنی بر آمین اکسیدازها یا ترانس گلوتاماز برای تشخیص آمین‌های بیوژنیک ساخته شده‌اند (Okuma, Okazaki, Usami, & Horikoshi, 2000; Punakivi, Smolander, Niku-Paavola, Mattinen, & Buchert, 2006).

در ادامه اطلاعات جمع‌آوری شده و خلاصه شده در جدول ۲، توضیحات گسترده‌تری برای روشن شدن اهمیت مطالعات ارائه می‌شود. (Park, Kim, Lee, & Jang, 2015).

جدول ۲- کاربرد حسگرهای زیستی مبتنی بر pH (Park *et al.*, 2015)

Table 2- Application of biosensors based on pH (Park *et al.*, 2015)

ماتریکس Matrix	مواد حسگر (منبع/نوع) Sensing material (source)	عملکرد Function	نتایج عمده Main results	غذا Food
فیلم‌های دولایه ژلاتین- صمغ ژلان Gelatin-Gellan gum bilayer films	انواع مختلف توت- آنتوسیانین ها Mulberry fruits—anthocyanins	حساسیت لایه‌ها به ترکیبات نیتروژنی فرار از طریق تغییر pH Sensitivity of the films to volatile nitrogen compounds through pH change	• استفاده از نانوذرات ZnO باعث بهبود ثبات رنگ فیلم‌ها شد. • فیلم‌های دولایه به آمونیاک حساس هستند. • فیلم صمغ ژلان-آنتوسیانین توت/ژلاتین ۰/۲ درصد تغییرات رنگی قابل مشاهده را نشان داد. The use of ZnO nanoparticles improved the color stability of the films; Bilayer films proved to be sensitive to ammonia; anthocyanins/Gellatin 2.0% film demonstrated visible color changes	ماهی کپور صلیبی Crucian fish
نشاسته	میوه‌های توت- آنتوسیانین‌ها Grape—anthocyanins	حساسیت لایه‌ها به ترکیبات نیتروژنی فرار از طریق تغییر pH Sensitivity of the films to volatile nitrogen compounds through pH change	• آنتوسیانین‌ها باعث تغییراتی در خواص مکانیکی شدند. • ورقه‌های نشاسته کاساوا با بالاترین محتوای آنتوسیانین به‌عنوان یک حسگر pH عمل می‌کنند و تغییرات رنگ را با تغییر محیط pH نشان می‌دهند. Anthocyanins caused changes in the mechanical properties; Cassava starch sheets with the highest content in anthocyanins proved to be effective to act as a pH-sensor, showing color changes when the pH environment changed	گوشت گاو و ماهی Beef and fish

آگارز Agarose	کلم قرمز و گل رز – آنتوسیانین Red cabbage and rose—anthocyanins	حساسیت لایه‌ها به ترکیبات نیتروژنی فرار از طریق تغییر pH Sensitivity of the films to volatile nitrogen compounds through pH change	• حسگر نسبت به افزایش تولید آمونیاک واکنش نشان داد و باعث تغییرات ساختاری در آنتوسیانین‌ها شد و در نتیجه تغییر رنگ مشاهده شد. • در شرایط شبیه‌سازی تولید آمونیاک، نشانگر از قرمز به سبز تبدیل شد. • نتایج مشابهی در هنگام تماس حسگر با گوشت گاومیش مشاهده شد The indicator sensor is reactive to an increase in ammonia production, causing conformational changes on anthocyanins and a color change was observed; _ Under simulating conditions of ammonia production, the indicator turned from red to green; Same results were observed when the indicator was in contact with buffalo meat	گوشت بوفالو Buffalo meat
نانوالیاف کیتین و متیل سلولز Chitin nanofiber and methylcellulose	زرشک قرمز – آنتوسیانین Red barberry—anthocyanins	حساسیت لایه‌ها به ترکیبات نیتروژنی فرار از طریق تغییر pH Sensitivity of the films to volatile nitrogen compounds through pH change	• خواص مکانیکی، نوری و فیزیکی–شیمیایی لایه‌ها با افزودن آنتوسیانین‌ها به فیلم نانوفیبر کیتین/متیل سلولز تغییر کرد. • هنگامی که فیلم‌ها در ظروف در تماس با ماهی‌های فاسد قرار گرفتند، پاسخ حساس به pH رنگ سنجی مشاهده شد. Mechanical, optical, and physical-chemical properties of the films changed when anthocyanins were added to the chitin nanofiber/methylcellulose film; A colorimetric pH-sensitive response was observed when the films were placed in contact with spoiled fish in containers.	ماهی Fish
پکتین Pectin	کلم قرمز – آنتوسیانین Red cabbage—anthocyanins	حساسیت لایه‌ها به ترکیبات نیتروژنی فرار از طریق تغییر pH Sensitivity of the films to volatile nitrogen compounds through pH change	• تغییر رنگ (بنفش به زرد) هنگام قرار گرفتن در معرض آمین‌های مختلف مشاهده شد. A color change (purple to yellow) was observed when exposed to different amines; Same behavior was observed when the film was introduced in the headspace of the package containing spoiled food products.	گوشت گاو، مرغ، میگو و ماهی Beef, chicken, shrimp and fish
کیتوزان، کربوکسی متیل سلولز Chitosan, carboxymethyl cellulose	پالپ پوست زغال اخته و انگور قرمز – آنتوسیانین Blueberry and red grape skin pulp—anthocyanins	حساسیت لایه‌ها به ترکیبات نیتروژنی فرار از طریق تغییر pH Sensitivity of the films to volatile nitrogen compounds through pH change	• عصاره‌ها بر خواص مکانیکی فیلم‌های تولید شده تأثیری نداشتند. • تغییرات رنگ در هر دو فیلم رخ داد. • تغییرات رنگ در کربوکسی متیل سلولز بیشتر از فیلم‌های کیتوزان مشهود بود. Extracts did not affect mechanical properties of the films produced; Color changes occur in both films; Color changes were more evident on carboxymethyl cellulose than on chitosan films.	گوشت مرغ Chicken meat
صمغ بذر لالامانتیا ایبریکا Lallemantia iberica seed gum	کورکومین Curcumin	حساسیت لایه‌ها به ترکیبات نیتروژنی فرار از طریق تغییر pH Sensitivity of the films to volatile nitrogen compounds through pH change	• خواص مکانیکی و بازدارنده فیلم‌ها با عصاره برگ تاج خروس افزایش یافت. • فیلم‌ها به دلیل تولید آمونیاک در اثر تخریب میگو، رنگ خود را از زرد به قرمز تغییر دادند. Mechanical and barrier properties of the films were enhanced by Amaranth leaf extracts; Films changed their color from, yellow to red due to ammonia production from shrimp degradation	میگو Shrimp

بسته‌بندی هوشمند

فناوری بسته‌بندی هوشمند مواد غذایی با گنجاندن حسگرها و شناسایی فرکانس رادیویی (RFID)[1] در بسته‌بندی، نظارت در مورد کیفیت غذاها را امکان‌پذیر کرده است. این فناوری همچنین به تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان این امکان را می‌دهد تا تاریخ یک محصول را از طریق نکات مهم در زنجیره تأمین مواد غذایی ردیابی کنند (Pavelková, 2013).

اگرچه اطلاعات کافی در مورد سیستم‌های بسته‌بندی هوشمندانه میوه‌ها و سبزیجات وجود ندارد، اما در سال‌های اخیر پیشرفت‌هایی در این زمینه حاصل شده است (Pavelková, 2013). میوه‌ها و سبزیجات به‌دلیل فرایند تنفس و آزادسازی CO_2 و در نتیجه تولید اتیلن، از مواد غذایی به شدت فاسدشدنی هستند. اتیلن یک هورمون گیاهی است که کامل شدن (رسیدن) میوه‌ها را تسریع می‌بخشد. پاکسازی و پایش بر محتوای اتیلن، و همچنین کاهش مقدار آن در فضای بسته می‌تواند اطلاعات ارزشمندی را ارائه دهد و برای جلوگیری از تخریب سریعتر

1- Radio frequency sensors and identification

مواد فاسد شدنی اهمیت دارد. حسگرهای رسیدن میوه به‌صورت تجاری در دسترس هستند، مانند احساس رسیده‌ای[1]، حسگری که به عطرهای منتشر شده از رسیدن میوه واکنش نشان می‌دهد و رنگ آن را از قرمز اولیه به زرد تغییر می‌دهد. تغییرات رنگ، نشان‌دهنده سطح رسیدن فعلی میوه است و به مصرف‌کنندگان اجازه می‌دهد تا براساس ترجیحات خود انتخاب کنند (Chen *et al*., 2012).

دی‌اکسید کربن (CO_2) یک افزودنی مهم غذایی و نشانگر کیفیت بسته‌بندی مواد غذایی است. هنگامی که غذا فاسد می‌شود، سطح CO_2 بیشتر به دلیل رشد میکروارگانیسم‌ها شروع به افزایش می‌نماید. علاوه بر این، CO_2 در بسته‌بندی اتمسفر اصلاح شده برای جلوگیری از رشد میکروبی استفاده می‌شود. امروزه یک حسگر CO_2 بر اساس پاسخ رنگ سنجی ترکیبی از لیزین، ε-پلی‌لیزین و آنتوسیانین تولید شده است. این ترکیب در محلول اتیل سلولز به‌صورت یک برچسب تولید شده است. استفاده از اتیل سلولز در مواد پوششی، نفوذپذیری نسبت به CO_2 و نفوذناپذیری در برابر پروتون‌ها را القا می‌کند (Purohit, Vernekar, Shetti, & Chandra, 2020).

تشخیص CO_2 توسط حسگرها مستقیماً با تغییر اسید آمینه و تشکیل اسید کاربامیک در ارتباط است، همین امر موجب تغییر pH شده و تغییر رنگ توسط آنتوسیانین‌ها، رخ می دهد. برچسب حسگر CO_2، تحت شرایط نگهداری در سرما، نشان داد که به قرار گرفتن در معرض CO_2 واکنش نشان می‌دهد، زمانی که غلظت CO_2 افزایش می‌یابد، از آبی به بنفش تغییر می‌کند و معرفی برای تازگی غذا است. اکسیژن یک محرک نامطلوب برای تخریب مواد غذایی است و از این نظر، بسته بندی اتمسفر اصلاح شده، برای کاهش برهمکنش محصولات غذایی با محیط اطراف استفاده می‌شود. به‌طور معمول، بسته‌بندی اتمسفر اصلاح شده شامل غلظت کم O_2 (۰-۲٪) و غلظت بالای CO_2 (۲۰-۸۰٪) است. استفاده از نانوحسگرها به دلیل توانایی بالقوه آن‌ها در تشخیص، شناسایی و تعیین کمیت پاتوژن‌ها، سموم، آلرژن‌ها و سایر نشانگرهای شیمیایی، پتانسیل زیادی در بسته‌بندی هوشمند دارند، هنگامی که در بسته‌بندی مواد غذایی بکار می‌روند، می‌توانند برای پایش تازگی غذا و کمک به تعیین ماندگاری دقیق‌تر مفید باشند (Wadhera, Kakkar, Wadhwa, & Raj, 2019).

تشخیص آلاینده‌ها و علف‌کش‌ها توسط جلبک‌ها

ریز جلبک‌های سبز جزء اصلی جمعیت‌های فیتوپلانکتون هستند. از آنجایی‌که آن‌ها می‌توانند تحت شرایط محیطی که می‌تواند برای سایر میکروارگانیسم‌ها مضر باشد زنده بمانند، از آن‌ها در توسعه حسگرهای زیستی استفاده شده است که می‌توانند به تغییرات حیاتی در اکوسیستم‌های آبی پاسخ دهند. ارزیابی سمیت آب یک موضوع مهم برای ایمنی آب در محیط‌زیست است. به‌عنوان مثال، علف‌کش‌ها به طور گسترده در کشاورزی برای حفاظت از محصولات استفاده می‌شوند، اما آن‌ها را نمی‌توان به راحتی از خاک حذف کرد. بنابراین، پس از استفاده، آن‌ها را می‌توان در خاک، آب‌های زیرزمینی و سطحی و بافت ها و مایعات بدن یافت. به دلایل ایمنی، تنها آثار بسیار کمی از علف کش‌ها باید در آب باقی بماند (Reynolds, 2006) . یکی از کاربردهای اصلی زیست‌حسگرهای ریزجلبکی، تشخیص آفت‌کش‌ها، حشره‌کش‌ها و قارچ‌کش‌ها می‌باشد. علف‌کش‌هایی که آنزیم استولاکتات سنتاز یا استوهیدروکسی اسید سنتاز را هدف قرار می‌دهند، از جمله پرمصرف ترین علف‌کش‌ها در جهان هستند. قانون آب اروپا بیان می‌کند که غلظت علف‌کش‌ها در آب باید برای هر گروه علف‌کش به‌ترتیب زیر ۰،۱ یا ۰،۵ میکروگرم در لیتر باشد (Giardi & Pace, 2005). بنابراین، علاقه فزاینده‌ای به توسعه سنجش‌های سریع، ارزان‌قیمت برای غربالگری حضور علف‌کش‌ها در محیط وجود دارد. با این حال، تجزیه و تحلیل فیزیکی و شیمیایی کلاسیک علف‌کش‌ها نیازمند یک مرحله پاک‌سازی نمونه و به‌دنبال آن استفاده از روش کروماتوگرافی مایع یا گاز و تشخیص طیف سنجی جرمی پشت سر هم، است. حسگرهای زیستی باید به فرصت‌های جدیدی برای توسعه روش‌های تحلیلی خودکار، سریع و مستقیم منجر شوند.

استفاده از حسگرهای زیستی، یکی از مفیدترین روش‌ها برای تعیین سمیت پساب‌های محیطی و صنعتی است. بسیاری از سنجش های زیستی مبتنی بر ریز جلبک‌ها در سال‌های اخیر توسعه یافته‌اند. آن‌ها نسبت به آنالیزهای فیزیکی یا شیمیایی بسیار حساس و قابل تکرار هستند. جلبک سبز *Chlorella vulgaris* به دلیل پایداری بیشتر در تولید سیگنال‌های بیولوژیکی معمولاً برای ساخت حسگرهای زیستی انتخاب می‌شود (Védrine, Leclerc, Durrieu, & Tran-Minh, 2003). فلورسانس کلروفیل ساطع شده از فعالیت فتوسنتزی آن، تشخیص آفت‌کش‌ها را امکان‌پذیر می‌کند و مهار فعالیت آلکالن فسفاتاز و استراز آن، تعیین فلزات سنگین و حشره‌کش‌های ارگانوفسفره را امکان‌پذیر می‌کند. حسگرهای زیستی کل سلولی براساس فلورسانس کلروفیل یا مهار آنزیم (فسفاتاز و استراز) ساخته شده‌اند (Durrieu, Badreddine, & Daix, 2003). نتایج نشان می‌دهد که این دستگاه ها نسبت به فلزات سنگین و آفت‌کش‌ها حساس هستند (Durrieu *et al*., 2003).

1- Ripe Sense

فلورسانس سیستم فتوسنتزی ریز جلبک‌ها

در حسگرهای زیستی جلبکی مبتنی بر فعالیت فتوسنتزی، فعالیت فتوسنتزی سلول‌های زنده با حضور آلاینده‌ها بررسی می‌شود که می تواند به سیگنال‌های الکتریکی یا نوری تبدیل شود. حسگرهای نوری براساس فلورسنس کلروفیل موجود در کلروپلاست‌ها هستند، در حالی که حسگرهای آمپرومتریک، میزان اکسیژن فتوسنتزی را با الکترود کلارک سنجش می‌کنند. حسگرهای زیستی مبتنی بر جلبک‌ها، در حال حاضر از فلورسانس کلروفیل به‌عنوان سیگنال قابل اندازه‌گیری استفاده می‌کنند. جذب نور در رنگدانه‌های به اصطلاح آنتن در غشای تیلاکوئید صورت می‌گیرد. انرژی به مرکز واکنش فتوسیستم‌ها منتقل می‌شود و توسط ارگانیسم‌ها برای تولید ATP استفاده می‌شود. تغییرات در فلورسانس کلروفیل در حضور مواد سمی را می‌توان اندازه‌گیری کرد و با غلظت آلاینده ارتباط داد (Rodriguez Jr, Sanders, & Greenbaum, 2002).

فتوسنتز در فتوسیستم دو (PSII)[1] آغاز می‌شود که در آن آب با آزاد شدن اکسیژن مولکولی به پروتون و الکترون تقسیم می‌شود. پروتون‌ها برای ایجاد یک گرادیان بالقوه در سراسر غشای تیلاکوئید استفاده می‌شوند که تولید ATP از ADP و فسفات را امکان‌پذیر می کند. الکترون‌ها وارد زنجیره انتقال الکترون می‌شوند و از طریق یک سری مولکول‌ها و پروتئین‌های انتقالی به فتوسیستم I (PSI) می‌روند. الکترون‌های برانگیخته در نهایت برای تولید NADPH استفاده می شوند که در چرخه کالوین برای تثبیت کربن و سایر واکنش‌های متابولیکی استفاده می‌شود (Pospíšil, 2009).

آلاینده‌ها یا علف‌کش‌ها در تماس با PSII، انتقال الکترون‌ها را از گیرنده اولیه QA به کینون QB ثانویه در طول زنجیره فتوسنتزی مهار می‌کنند و تا حدی یا به‌طور کامل، انتقال الکترون را مسدود می‌کنند. این مهار منجر به تغییر در انتشار فلورسانس PSII می‌شود که می‌تواند با تجزیه و تحلیل فلورسانس نظارت شود. علف‌کش‌هایی که PSII را هدف قرار می‌دهند به انواع مختلفی از کلاس‌های شیمیایی تعلق دارند، به‌عنوان مثال، تری‌آزین‌ها، تری‌آزینون‌ها، اوره‌ها، بیس‌کاربامات‌ها، دینیتروفنول‌ها و سیانوفنول‌ها (Brayner, Couté, Livage, Perrette, & Sicard, 2011a). حسگرهای زیستی فیبر نوری برای تجزیه و تحلیل علف‌کش‌ها با استفاده از سه ریز جلبک مختلف *Dictyosphaerium chlorelloides*، *Scenedesmus* sp. و *Scenedesmus intermedius* مورد بررسی قرار گرفتهاند (Brayner *et al.*, 2011a).

به این منظور، ریز جلبک‌ها در یک ماتریکس سل–ژل سیلیکات سدیم بی‌حرکت شدند، تا فعالیت بیولوژیکی خود را حفظ کنند. افزایش مقدار فلورسانس کلروفیل برای تعیین کمیت علف‌کش‌هایی که فتوسنتز را در PSII مهار می‌کنند، به‌عنوان مثال تریازین‌ها (آترازین، سیمازین، تربوتیلازین) و علف‌کش‌های مبتنی بر اوره (لینورون) استفاده شد. بهترین نتایج، یعنی پایین‌ترین حد تشخیص، وسیع‌ترین محدوده کالیبراسیون دینامیکی، پاسخ دقیق و برگشت‌پذیری، با استفاده از *Dictyosphaerium chlorelloides* به دست آمده است (Brayner *et al.*, 2011a).

فوتو آمپرومتری

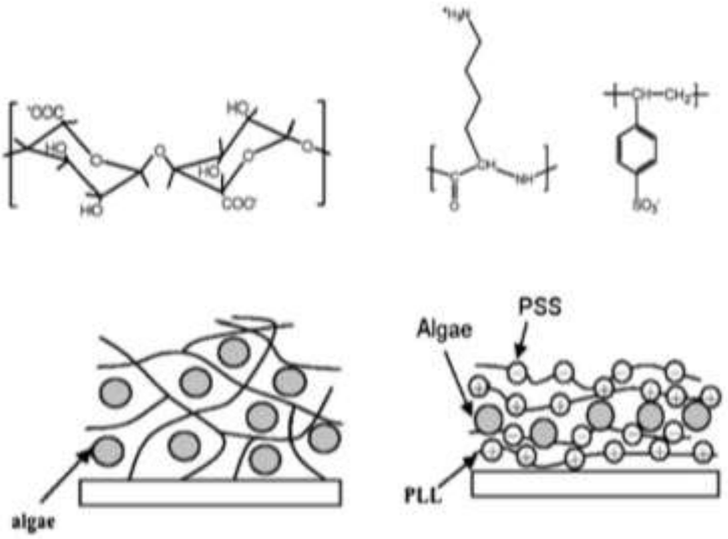
فوتوآمپرومتری، روش سریعی است که می‌تواند چند نقطه قبل از اکی والان و چند نقطه بعداز اکی والان را ثبت کند. در محلول‌های رقیق به راحتی کاربرد دارد. همچنین یک حسگر زیستی یکبار مصرف با روش فوتوآمپرومتری برای تشخیص سریع سمیت با استفاده از ریز جلبک سبز *Chlorella vulgaris* مورد استفاده قرار گرفت. در این حسگر زیستی، ریز جلبک‌ها در یک ژل آلژینات یا یک غشای کمپلکس پلی یونی که مستقیماً بر روی سطح الکترود شفاف ITO (تین اکسید ایندیوم) تثبیت شده بود، به دام افتادند. اکسیژن تولید شده فتوسنتزی توسط این ریز جلبک‌های تثبیت شده به‌صورت آمپرومتریک بررسی شدند (شکل ۱). پاسخ زیست حسگر جلبک‌ها در حضور چهار ترکیب سمی مورد آزمایش قرار گرفت: آترازین (۶–کلرو–N–اتیل–N–ایزوپروپیل–۱،۳،۵–تریازین–۲،۴ دیامین)، DCMU (۳–(۳،۴–دی کلروفنیل))–۱،۱–دی اتیل اوره)، تولوئن و بنزن. همبستگی خوبی بین نتایج حاصل از این اندازه‌گیری‌های آمپرومتریک و نتایج به‌دست آمده از یک آزمون رشد استاندارد معمولی به‌دست آمد. مزایای اصلی این حسگر زیستی جدید این است که بسیار ارزانتر است و زمان سنجش آن نسبت به دیگر حسگرهای زیستی جلبکی معمولی مبتنی بر الکترودهای کلارک بسیار کوتاهتر (≥۲۰۰ ثانیه) است (Shitanda *et al.*, 2005).

حسگرهای زیستی گاز برای ترکیبات آلی فرار (VOC) توسط جلبک‌ها

بیشتر حسگرهای زیستی مبتنی بر آنزیم‌ها یا میکروارگانیسم‌ها فقط در محلول‌های آبی مؤثر هستند. ساختن حسگرهای زیستی که در فاز گاز عمل می‌کنند، می‌توانند به‌عنوان یک وسیله هشدار دهنده برای نظارت کیفیت هوادرمحل کار مفید باشند. ترکیبات آلی فرار اغلب به شکل بخار در تصفیه خانه‌های شهری استفاده می‌شوند. آن‌ها همچنین بر فعالیت فتوسنتزی ریز جلبک‌های *کلرلا ولگاریس* تأثیر می‌گذارند. این حسگرها بر اساس سلول‌های *کلرلا ولگاریس* تثبیت شده بر روی

1- Photosystem II (PSII)

غشای یک الکترود اکسیژن کلارک طراحی شده‌اند. این حسگر زیستی، اکسیژن تولید شده توسط فعالیت فتوسنتزی ریز جلبک‌ها را در زیر نور و در حضور دی اکسید کربن اتمسفر اندازه‌گیری می‌کند. حسگر زیستی در داخل یک محفظه اتمسفر کنترل‌شده نگهداری می‌شود و یک مخزن آب به بدنه الکترود ثابت می‌شود تا رطوبت را فراهم کند و سلول‌های جلبکی به درستی کار کنند. اسپری کردن یک ترکیب سمی (پرکلرواتیلن) به داخل محفظه اتمسفر کنترل شده، منجر به تغییر اکسیژن تولیدی در زیر نور شده و این را می‌توان با الکترود کلارک تشخیص داد (Altamirano *et al*., 2004).



شکل ۱- ساختمان مولکولی ریز جلبک‌های تثبیت شده روی الکترود ITO (Shitanda *et al*., 2005)

Fig. 1. Molecular structure of microalgae immobilized on ITO electrode (Shitanda *et al*., 2005)

افزایش حساسیت حسگرهای زیستی مبتنی بر ریزجلبک‌ها

حسگرهای زیستی جلبکی معمولاً حساسیت بالا و دقیقی دارند. اما به‌منظور افزایش میزان حساسیت، در تحقیقی از دو ژنوتیپ مختلف برای شناسایی یک آلاینده معین استفاده گردید. در این روش، دو ژنوتیپ از ریز جلبک سبز *Dictyosphaerium chlorelloides* به طور همزمان استفاده شد؛ یک ژنوتیپ حساس برای به دست آوردن حساسیت (نوع وحشی DcG1wt) و یک ژنوتیپ جهش مقاوم به TNT. مهار کلروفیل فلورسانس PSII توسط TNT به‌عنوان سیگنال بیولوژیکی استفاده شد. در چنین حسگرهای زیستی جلبکی، پاسخ بیولوژیکی سلول‌ها در حضور آلاینده‌ها کاهش می‌یابد. این زیست حسگر TNT جلبکی کم هزینه نسبت به دیگر سیستم‌های سنجش حساس‌تر و حد تشخیص آن ۰/۵ میلی‌گرم در لیتر می‌باشد. پاسخ زمانی زیست حسگر بیان شده پنج برابر سریع‌تر است (Roberta, Alain, Jacques, Catherine, & Clemence, 2011).

حسگرهای زیستی یون‌های فلزی

ریز جلبک‌ها، میل ترکیبی قوی برای یون‌های فلزی دارند. آن‌ها می‌توانند مقادیر زیادی فلز را از محیط خود جمع کنند و در حال حاضر به‌عنوان جاذب زیستی برای پیش تغلیظ فلز قبل از تیتراسیون با دستگاه های تحلیلی استفاده می‌شوند. فلزات با روش‌های فیزیکی وشیمیایی مرسوم، برای مثال جذب نوری یا طیف سنجی انتشار پلاسما، تجزیه و تحلیل می‌شوند (Carrilho, Nóbrega, & Gilbert, 2003) .

بسیاری از فلزات مانند کروم، کبالت، مس، کادمیوم یا جیوه را می توان توسط ریز جلبک‌ها تثبیت کرد. در میان این فلزات، جیوه یکی از سمی‌ترین فلزات است، زیرا به واکنش با مولکول‌های آلی با ایجاد پیوندهای قوی C-Hg تمایل دارد. بنابراین بسیار مهم است که بتوان ردپای این فلز را در آب تشخیص داد. CH_3Hg^+ و Hg^{+2} مهم‌ترین ترکیبات جیوه در محیط‌های آبی هستند، به‌خصوص اینکه CH_3Hg^+ به دلیل انتشار از طریق غشاهای بیولوژیکی بسیار خطرناک است. نتایج جالبی در سال‌های اخیر با استفاده از ریز جلبک سبز *Chlorella vulgaris* تثبیت شده روی یک بستر جامد (سیلیکاژل) به‌دست آمده است (Tajes-Martinez *et al*., 2006). در این زیست حسگر زیستی، جیوه زدایی معمولاً با استفاده از کامپوزیت سیلیکا-جلبک انجام می‌شود و CH_3Hg^+ و Hg^{+2} به‌طور مؤثر در ستون حفظ می‌شوند. راندمان جذب برای هر دو ترکیب در pH ۳ بالاتر از ۹۷ درصد بود. سپس با افزودن HCl می‌توان آن‌ها را به‌صورت متوالی در pH پایین‌تر شستشو داد. یکی از مزایای اصلی استفاده از ریز جلبک‌ها این است که ظرفیت نگهداری فلزات سنگین را به مدت سه هفته در دمای صفر درجه سانتی گراد دارند. بنابراین، ترکیبات جیوه را می‌توان تا زمان تجزیه و تحلیل

ذخیره کرد. بنابراین، *کلرا ولگاریس* تثبیت شده روی سیلیکاژل، یک جایگزین امیدوارکننده کم‌هزینه برای آنالیز جیوه است (Tajes-Martínez, Beceiro-González, Muniategui-Lorenzo, & Prada-Rodríguez, 2006).

علاوه بر آن، برخی از ارگانیسم‌های حامل ژن‌های گزارشگر شب تاب که با پروموترهای القای یون‌های فلزی ترکیب شده‌اند، ممکن است به‌عنوان حسگرهای زیستی برای تشخیص یون‌های فلزات سنگین زیستی در نمونه‌های محیطی استفاده شوند. به‌عنوان مثال، *Synechococcus* PCC 7942 (pJLE23) قادر به تشخیص کاتیون هایی مانند Zn^{+2} در محلول‌های آبی در سطوح بسیار پایین‌تر از حداکثر توصیه‌شده سازمان بهداشت جهانی برای آب آشامیدنی (۵ میلی‌گرم در لیتر، ۸۰ میکرومول در لیتر) است (Brayner, Couté, Livage, Perrette, & Sicard, 2011b).

برای بهبود تکرارپذیری آزمایش‌های سم‌شناسی در حضور فلزات سنگین، سیانوباکتری‌ها را می‌توان در ماتریکس‌های مختلف تثبیت کرد. به‌عنوان مثال، سیانوباکتریوم *Anabaena torulosa* با استفاده از ماتریکس پلی (۲-هیدروکسیل اتیل متاکریلات) روی یک الکترود اکسیژن بی‌حرکت شد. رفتار این میکروارگانیسم در حضور سرب با اندازه گیری تغییرات آزادسازی اکسیژن فتوسنتزی بررسی شد. نتایج نشان داد که حداکثر میزان جذب سرب توسط *Anabaena torulosa* ۰/۴ میلی‌گرم در لیتر بود (Carrilho *et al*., 2003).

فعالیت آلکالین فسفاتاز

فعالیت آلکالین فسفاتاز (APA) ریز جلبک *کلرا ولگاریس* در حضور فلزات سنگین مهار می‌شود، از این خاصیت می‌توان برای سنجش فلزات سنگین استفاده کرد. بنابراین یک زیست حسگر برای تشخیص فلزات سنگین با استفاده از خاصیت مهار آلکالین فسفاتاز (AP) با استفاده از غشای خارجی *کلرا ولگاریس* ساخته شده است (Guedri & Durrieu, 2008). در این زیست حسگر ریز جلبک‌ها بین دو الکترود پلاتینیومی قرار می‌گیرند و مبدل را تشکیل می‌دهند. فعالیت APA جلبک از طریق تغییر در هدایت اندازه‌گیری می‌شود. در واقع دقت این حسگرها بسیار بالا است که حتی غلظت یون‌های فلزی زیر ppb۱۰ نیز قابل شناسایی است. این حسگرهای زیستی برای یک فلز خاص نیستند و به حضور فلزات سنگین پاسخ کلی ارائه می‌دهند و می توانند به‌عنوان یک سیستم هشدار اولیه در نظر گرفته شوند (Chouteau *et al*., 2004; Védrine *et al*., 2003).

فعالیت آلکالین فسفاتاز (AP) از طریق اندازه‌گیری‌های نوری یا رسانایی تعیین می‌شود. به عنوان مثال، سلول‌های *کلرا ولگاریس* در داخل غشاهای آلبومین سرم گاوی (BSA) که با گلوتارآلدئید پیوند متقابل دارند، تثبیت شدند. APA در حضور یون‌های کادمیوم اندازه گیری شد. اندازه‌گیری فسفاتاز غشایی APA را می‌توان بر روی سلول های کامل، بدون هیچ مرحله استخراج انجام داد و در نهایت فلزات جذب شده در سطح سلول تشخیص داده می‌شوند. سولفات مس یکی از مواد کشنده‌ای است که معمولاً برای تصفیه آب‌های سطحی دریاچه ها، مخازن و سایر منابع آب استفاده می‌شود. همچنین در حال حاضر به‌عنوان حشره‌کش در کشاورزی استفاده می‌شود. به‌طوری‌که یون‌های Cu^{+2} وارد زنجیره غذایی می‌شوند و تنوع زیستی را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهند. بنابراین توسعه یک روش غربالگری برای تشخیص مس در آب بسیار مهم است (Chouteau *et al*., 2004; Guedri & Durrieu, 2008).

زیست حسگرهای سیانوباکتری‌ها

سیانوباکترهای نوع وحشی اولین موجوداتی هستند که برای توسعه حسگرهای زیستی استفاده می‌شوند. این موجودات فوتوتروف از نظر اکولوژیکی مهم و بنابراین برای نظارت بر ترکیباتی مانند علف‌کش هایی که فعالیت فتوسنتزی موجودات را مهار می‌کنند، مناسب هستند. سیانوباکتری‌های تثبیت شده (*Synechocystis* و *Synechococcus*) همچنین می‌توانند به‌عنوان حسگرهای زیستی برای تشخیص سمیت آب به‌دلیل متابولیسم همه‌کاره‌شان، برای مثال فعالیت فتوسنتزی (غشاهای تیلاکوئید در سلول‌های رویشی)، تنفس، تخمیر و تثبیت نیتروژن (سلول‌های هتروسیت) استفاده شوند. زیست‌حسگرهای آمپرومتریک مبتنی بر سیانوباکتری‌ها نیز برای تشخیص آلاینده‌های فیتوتوکسیک استفاده شده‌اند با این حال، آن‌ها پایدار و قوی نیستند. (Lin *et al*., 2010)

برای غلبه بر این معایب، سلول‌های میکروبی را می‌توان با معرفی یک "ژن گزارشگر" اصلاح ژنتیکی کرد تا تعاملات بیولوژیکی را به راحتی به یک سیگنال خروجی قابل ضبط (مثلاً نور) تبدیل کند. متداول ترین پروتئین‌های گزارشگر بتا گالاکتوزیداز، پروتئین فلورسنت سبز (GFP) و لوسیفراز هستند (Liu & Wang, 2009).

به‌نظر می‌رسد زیست حسگرهای سیانوباکتری‌ها در تشخیص سمیت علف‌کش‌ها نسبت به روش‌های دیگر، مانند حسگرهای زیست سلولی و بافتی مبتنی بر فتوسیستم، ساده‌تر، سریع‌تر، دقیق‌تر و مقرون به صرفه‌تر باشند. همچنین می‌توان برای نشان دادن نوع علف‌کش و احتمالاً نحوه عملکرد بالقوه آن‌ها از این زیست‌حسگرها استفاده کرد. یکی از معایب این روش، نیاز به دانش کار با ابزارهای ژنتیکی است. برای غلبه بر این محدودیت، فعالیت فتوسنتزی سیانوباکتری‌ها در حضور علف‌کش‌ها با اندازه‌گیری‌های فوتوالکتروشیمیایی و آمپرومتریک دنبال می‌شود. علف‌کش‌ها عموماً مهارکننده‌های جریان الکترون وابسته به PSII هستند (Shao, Howe, Porter, & Glover, 2002).

حسگرهای مبتنی بر دیاتومه‌ها

دیاتوم‌ها، برجسته‌ترین ریز جلبک‌ها در اقیانوس‌ها و آب‌های شیرین هستند. آن‌ها میکروارگانیسم‌های یوکاریوتی هستند که مواد ژنتیکی آن‌ها محدود به هسته سلول است. این جلبک‌های فتوسنتزی نقش مهمی در چرخه کربن، تثبیت دی اکسید کربن (CO_2) و آزادسازی اکسیژن دارند. تقریباً ۲۵ درصد از کل تثبیت کربن آلی روی این سیاره (تبدیل دی‌اکسید کربن و آب به قند با استفاده از انرژی نور) توسط دیاتوم‌ها انجام می‌شود. آن‌ها کلروفیل a و c، گزانتوفیل (از جمله دیاتوکسانتین) و کاروتنوئیدها (که مسئول رنگ زرد معمولی آن‌ها هستند) را سنتز می‌کنند. محل‌های رنگدانه در داخل تیلاکوئیدهای کلروپلاست (دستگاه فتوسنتزی) قرار دارند. اولین ماده‌ای که در طی فرآیند فتوسنتز تولید می‌شود، یک پلیمر از گلوکز به نام کریزولامینارین است که از لوکوزین و کریزوز همراه با لیپیدها تشکیل شده است (Nassif & Livage, 2011).

دیاتوم‌ها همچنین تولیدکننده سیلیکون، دومین عنصر فراوان، پس از اکسیژن، در پوسته زمین هستند. سنگ‌های سیلیکا به آرامی در آب حل می‌شوند و اسید سیلیسیک $Si(OH)_4$ را ایجاد می‌کنند که برای ساختن یک پوشش بیرونی به نام frustule استفاده می‌شود که از سیلیس و ماده آلی سنتز شده توسط سلول دیاتومه ساخته شده است. این پوسته سفت و سخت از دو دریچه تشکیل شده است که توسط یک سری نوارهای سیلیسی به هم متصل شده‌اند.

نوارهای سیلیسی ممکن است از ۱ میکرومتر تا چند میلی‌متر باشد (De & Mazumder, 2022a). این پوسته‌های معدنی تنوع باورنکردنی از اشکال پیچیده دارند. ابعاد و تزئینات آن‌ها اولین ویژگی طبقه‌بندی است که برای تشخیص جنس و گونه استفاده می‌شود. نوارهای سیلیسی، به‌تدریج از طریق تراکم و کم آبی به نوعی سنگ به نام دیاتومیت یا زمین دیاتوم تبدیل می‌شوند. این ماده متخلخل امروزه به‌طور گسترده‌ای برای فیلتر کردن آبجو، شراب و آب استخرها یا به عنوان افزودنی به رنگ‌ها و پلیمرها استفاده می‌شود. دینامیت اختراع شده توسط آلفرد نوبل از آغشته کردن دیاتومیت متخلخل به مواد منفجره مایع بسیار حساس، به‌عنوان مثال نیتروگلیسیرین، بدست آمد (Mazumder & Gordon, 2022).

به دلیل متخلخل بودن آن‌ها، خواص بیوسنینگ دیاتوم‌ها براساس خواص متابولیکی سلول و هم براساس خواص فیزیکی پوسته سیلیس است. کم هزینه بودن و توزیع گسترده دیاتوم‌ها آن‌ها را به کاندیدای مناسبی در زمینه فناوری نانو تبدیل کرده است. دیاتوم‌ها به تغییرات آب و هوایی در شرایط دریاچه و رودخانه بسیار حساس هستند. دیواره سلولی سیلیسی آن‌ها را می‌توان به خوبی در رسوبات حفظ کرد. بنابراین مطالعه فسیل‌های دیاتوم می‌تواند ابزار مهمی در بازسازی شرایط دیرینه اقلیم باشد. آن‌ها برای نزدیک به ۲۰۰ میلیون سال آثار زندگی بر روی زمین از خود به جای گذاشته‌اند (De & Mazumder, 2022b).

دیاتوم‌ها به‌عنوان یک تولیدکننده اولیه، ارگانیسم‌های کلیدی در اکوسیستم آب هستند. آن‌ها در سراسر منطقه روشن هر اقیانوس و در نهرها و دریاچه‌های آب شیرین زندگی می‌کنند. هر آبی در هر نقطه از کره زمین حاوی گونه‌های مختلفی از دیاتوم‌ها است که در یک مجموعه یا اجتماع زندگی می‌کنند. از آنجایی که آن‌ها نسبت به آلودگی ارگانیک حاصل از کشاورزی یا صنعت بسیار حساس هستند، تجزیه و تحلیل جمعیت دیاتوم‌ها امکان ارزیابی میزان آلودگی و فرسایش رودخانه‌ها را فراهم می‌کند. می‌توان از آن به‌عنوان یک روش بیولوژیکی ساده برای پایش کیفیت آب استفاده کرد که از نیاز به تجزیه و تحلیل فیزیکی وشیمیایی پیچیده جلوگیری می‌کند. دیاتوم‌های آب شیرین به‌عنوان شاخص‌های قابل اعتمادی از وضعیت تغذیه‌ای رودخانه ها و دریاچه‌ها در نظر گرفته می‌شوند. در دهه‌های اخیر، چندین شاخص برای ارزیابی شرایط تغذیه‌ای در سراسر اروپا توسعه یافته است. از شاخص بیولوژیکی دیاتوم‌ها، به‌عنوان یک شاخص بیولوژیکی برای ارزیابی کیفیت محیط‌های آبی استفاده می‌شود (Coste, Boutry, Tison-Rosebery, & Delmas, 2009). دانشمندان همچنین دریافته‌اند که دیاتوم‌ها به آلاینده‌های فلزی بسیار سمی مانند کادمیوم حساس هستند (Mazumder & Gordon, 2022).

صدف‌های آهکی دیاتومه ساختار متخلخل قابل توجهی با توزیع منافذ از مقیاس نانو تا میکرو دارند. آن‌ها را می‌توان به‌عنوان دستگاه های نانو سه بعدی آماده در نظر گرفت. بیش از ۱۰۵ گونه مختلف از دیاتوم‌ها شناسایی شده است (Mazumder & Gordon, 2022). دیاتوم‌هارا می‌توان به راحتی کشت داد و مقادیر زیادی از نوارهای سیلیسی کنترل شده ژنتیکی را ایجاد کرد. بنابراین، این پوسته‌های سیلیسی سه بعدی می‌توانند پایه‌ای را برای دستگاه‌های الکترونیکی جدید، به‌عنوان مثال حسگرهای گازی که می‌توانند آلودگی را سریع‌تر و کارآمدتر از دستگاه‌های معمولی تشخیص دهند، فراهم کنند (Giere, 2008).

استفاده سودمند از صدف‌های آهکی دیاتومی در زمینه میکرو حسگرهای نوری برای شناسایی مواد فرار خواهد بود. یک ویژگی کلیدی برای یک مبدل نوری، که باید به بخارات و گازها حساس باشد، یک سطح بزرگ است تا بتواند تعامل بسیار مؤثری با چندین ماده جاذب ایجاد کند. ابعاد منافذ دیاتوم‌ها فقط در محدوده نانومتری است، بنابراین بسیاری از مواد فرار (حلال‌ها، هیدروکربن‌ها و غیره) و حتی گازهای خالص می‌توانند در منافذ نفوذ کرده و متراکم شوند (Saraswati & Srinivasan, 2015).

سیلیس دارای خواص نورتابی در محدوده مرئی است. انتشار فوتولومینسانس در ناحیه زرد نیز برای نوارهای سیلیسی دیاتوم‌های سیلیکا مشاهده می‌شود. این فعالیت لومینسانس مربوط به نقایص استوکیومتری سطح–اکسیژن است. بنابراین می‌تواند تحت تأثیر حتی تغییرات کوچک محیط گاز اطراف قرار گیرد. تشخیص گاز در غلظت های پایین نیز امکان‌پذیر است و حد تشخیص کمتر از ۵۰ ppb را می توان برای صدف‌های آهکی دیاتومی با بالاترین سطح خاص به‌دست آورد. بنابراین، این موجودات طبیعی کاندیدهای خوبی به‌عنوان مواد حسگر نوری برای تشخیص گازهای سمی یا نظارت بر آلودگی هوا هستند (De Stefano, Rendina, De Stefano, Bismuto, & Maddalena, 2005a). همچنین می‌توان از صدف‌های آهکی دیاتومی به‌عنوان الگویی برای ساخت مواد نانوساختار استفاده کرد. پوسته‌های سیلیسی را می‌توان بدون از دست دادن نانوساختار سه بعدی خود، به صورت شیمیایی به مواد اکسیدی دیگر تبدیل کرد. در چنین فرآیندی، سیلیس به ترکیب جدیدی تبدیل می‌شود. به‌عنوان مثال، پوسته سیلیس می‌تواند با حرارت دادن در بخار منیزیم در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴ ساعت به MgO تبدیل شود. به این ترتیب بسیاری از مواد اکسید نانوساختار دیگر (TiO_2، ZrO_2، $BaTiO_3$) سنتز شده‌اند (Bao *et al.*, 2007; Sandhage *et al.*, 2005).

برخی از دیاتوم‌ها دارای خواص رنگین کمانی هستند که از ساختار متخلخل عجیب آن‌ها ناشی می‌شود. منافذ به‌طور تصادفی بین پوسته سیلیکا توزیع نمی‌شوند. آن‌ها گاهی اوقات یک شبکه تناوبی منظم با فاصله متوسط در حدود ۰/۵ میکرومتر تشکیل می‌دهند. بنابراین، می توان صدف‌های دیاتومی را به‌عنوان «بلورهای فوتونی زنده» توصیف کرد. فعل و انفعالات قوی ممکن است بین نور و ماده رخ دهد. نور در "کریستال‌های فوتونیک" مانند الکترون‌ها در مواد نیمه‌رسانا رفتار می کند. در نتیجه نوارهای سیلیسی دیاتوم‌ها رنگین کمانی مانند اوپال دارند. نوارهای سیلیکا، نور را در ناحیه آبی جذب می‌کنند، خاصیتی که از دیاتوم‌ها در برابر تابش بیش از حد محافظت می‌کند و فتوسنتز آن‌ها را افزایش می‌دهد (Bao *et al.*, 2007).

حسگرهای مبتنی بر دیاتوم‌ها برای تشخیص سریع الکتروشیمیایی بدون برچسب به‌عنوان شناساگرهای زیستی قلبی عروقی نیز شناخته شده‌اند. حسگر زیستی از مجموعه‌ای از نانو الکترودهای طلا که روی یک تراشه سیلیکونی قرار گرفته‌اند، ساخته شده است و هر حسگر توسط یک نوارسیلیسی دیاتوم پوشانده شده است که حساسیت کافی برای تشخیص بیماران در معرض خطر بیماری قلبی عروقی را دارد (Coste *et al.*, 2009)

تثبیت ریز جلبک‌ها

یکی از مراحل محدودکننده در توسعه حسگرهای زیستی ریزجلبکی، تثبیت مواد زیستی در یک ماتریکس است، بدون آنکه پایداری و فعالیت آنها کاهش پیدا کند. بیشتر تکنیک‌های تثبیت متکی به استفاده از تکیه گاه‌های آلی مانند پلی وینیل الکل (PVA) یا پلی سولفون (PSU) هستند که برای برخی از گونه‌های جلبکی ممکن است سمی باشند. ترکیبات زیست سازگار بیشتر شامل پلیمرهای زیستی مانند آلژینات کلسیم است. با این حال آن‌ها پایدار نیستند و نمی‌توان از آن ها طولانی مدت استفاده کرد. بنابراین به‌نظر می‌رسد ماتریکس ساخته شده از مواد سیلیسی متخلخل، مناسب ترین ماتریکس باشد که برای سلول‌های زنده غیر سمی هستند و در برابر حمله میکروبی مقاومت می کنند (Moreno-Garrido, 2008). استفاده از ژل پرکاربردترین تکنیک برای تثبیت جلبک است. می‌توان آن را با پلیمرهای مصنوعی (آکریل آمید، رزین‌های متقاطع عکس، پلی یورتان‌ها)، پروتئین‌ها (ژلاتین، کلاژن یا سفیده تخم مرغ)، یا پلی ساکاریدهای طبیعی (آگار، کاراگینان یا آلژینات) انجام داد. برای بهبود پایداری عملکردهای بیولوژیکی، تکنیک‌های مختلف تثبیت پیشنهاد شده است، از آن جمله می‌توان به ریزپوشانی در یک غشای تراوا، جذب به مشتقات سلولز، تثبیت در ژل و ایجاد شبکه در گلوتارآلدئید و ماتریکس آلبومین–گلوتارآلدئید، اشاره کرد. در میان ژل‌ها، پلی وینیل الکل (PVA) اغلب به‌عنوان ماتریکس برای تثبیت انواع آنزیم‌ها و سلول‌ها استفاده می‌شود. گونه‌ای از این پلیمر از گروه‌های استیریل پیریدینوم متصل به پلی وینیل الکل (PVA-SbQ) استفاده می‌کند تا زنجیره‌های پلیمری را تحت شرایط ملایم بدون آسیب رساندن به مواد بیولوژیکی، به هم متصل کنند (Antonacci & Scognamiglio, 2020).

حسگرهای زیستی ریز جلبکی باید پس از استفاده دوباره تولید شوند، اما بیشتر تکنیک‌های تثبیت به‌طور برگشت‌ناپذیر سلول‌ها را متصل می‌کنند و از تولید زیست حسگرهای قابل استفاده مجدد جلوگیری می‌کنند. چندین گروه در تلاش برای بهبود این روند هستند، اما نتایج هنوز خیلی خوب نیست و مطالعات هنوز در حال انجام است. یک روش راحت می‌تواند استفاده از ریز جلبک‌های پوشش داده شده با نانوذرات مغناطیسی زیست سازگار (NdFeB) باشد. سلول‌های زنده توسط میدان مغناطیسی به سطح الکترود به صفحه نمایش جذب می شوند. سپس با خاموش شدن میدان مغناطیسی به راحتی می‌توان آن‌ها را حذف کرد (Zamaleeva *et al.*, 2011).

فرآیند سل–ژل برای کپسوله کردن سلول‌های گیاهی

ماتریکس‌های سیلیکا برای سنتز نسبتاً ارزان هستند و خواص جالبی از جمله شفافیت نوری و سازگاری زیستی دارند، بدون اینکه دارای اثرات شیمیایی مضر باشند. به‌عنوان مثال، سیلیس جلبکی می

تواند در جلوی نوک یک فیبر نوری برای ساخت یک حسگر زیستی نوری قرار گیرد. فیبر نوری می‌تواند برای ارسال تابش به سلول‌های جلبکی و انتقال تشعشعات فلورسنت به یک فلورسنج مورد استفاده قرار گیرد. به‌طور مشابه، فیلم‌های سل-ژل را می‌توان روی یک الکترود برای اندازه‌گیری‌های آمپرومتری قرار داد (Afreen, Tyagi, Singh, & Singh, 2021).

نتیجه‌گیری

بسته‌بندی مواد غذایی عامل مهمی برای حفظ و نگهداری کیفیت محصولات غذایی است. استفاده از بسته‌بندی هوشمند مسیری نوآورانه برای ارائه اطلاعات دقیق‌تر نه تنها برای تامین‌کنندگان بلکه مهم‌تر از همه برای مصرف‌کنندگان است.

استفاده از رنگدانه‌های طبیعی حاصل از جلبک‌ها، که دارای خواص ضد میکروبی و آنتی‌اکسیدانی هستند در بسته‌بندی مواد غذایی، می تواند به افزایش ماندگاری محصولات بسته‌بندی شده کمک کند. بنابراین، این حسگرهای زیستی یک کاربرد بالقوه در سیستم‌های بسته بندی هوشمندانه مواد غذایی را دارند. علی‌رغم تأثیر مثبت آن‌ها برای استفاده به‌عنوان حسگر pH، این رنگدانه‌ها نسبت به دما، O_2 و نور ناپایداری نشان می‌دهند. بنابراین، مطالعات بیشتری برای بهبود کارایی و پایداری نشانگرها در ماتریس پلیمری مورد نیاز است.

علاوه بر آن نتایج این مقاله نشان می‌دهد که ریز جلبک‌ها می توانند به‌عنوان حسگرهای زیستی برای شناسایی آلاینده‌هایی مانند علف‌کش‌ها، فلزات سنگین و ترکیبات آلی فرار استفاده شوند. این زیست حسگرها نسبت به آنالیزهای فیزیکی یا شیمیایی بسیار حساس و قابل تکرار هستند. یکی از مزایای اصلی این حسگرهای زیستی ریزجلبکی این است که اندازه‌گیری‌های مکرر را می‌توان بدون آماده‌سازی گسترده نمونه انجام داد. آن‌ها همچنین می‌توانند انتخابی باشند، به‌عنوان مثال فلورسانس کلروفیل ساطع شده از فعالیت فتوسنتزی، امکان تشخیص علف‌کش‌ها را فراهم می‌کند، در حالی‌که مهار آلکالین فسفاتاز و استراز امکان تعیین فلزات سنگین و حشره‌کش‌های ارگانوفسفره را فراهم می کند. دستگاه‌های حسگر مختلفی را می‌توان بر این اساس ساخت. حسگرهای نوری بر اساس فلورسانس کلروفیل موجود در کلروپلاست هستند، در حالی‌که حسگرهای آمپرومتریک میزان اکسیژن فتوسنتزی را دنبال می‌کنند. تخمین‌زده شده است که ۲۰۰۰۰۰ تا ۸۰۰۰۰۰ گونه ریز جلبک وجود دارد که تنها حدود ۳۵۰۰۰ مورد از آن‌ها شرح داده شده است. بنابراین، پتانسیل عظیمی برای توسعه بیشتر وجود دارد. در سال‌های اخیر پیشرفت‌های زیادی در شناسایی ژن‌ها و مسیرهای مرتبط در ریزجلبک‌ها صورت گرفته و تکنیک‌های قدرتمندی برای مهندسی ژنتیک توسعه‌یافته است. در مجموع، پیشرفتی که در این زمینه ها محقق شده است، به سرعت توانایی ما را برای بهینه‌سازی ژنتیکی تولید حسگر زیستی‌های حساس‌تر مبتنی بر ریز جلبک‌ها افزایش خواهد داد.

در مقاله مروری حاضر، حسگرهای زیستی ریزجلبکی مبتنی بر سه خانواده ریز جلبک‌های یوکاریوتی (جلبک سبز، دیاتوم‌ها) و پروکاریوتی (سیانوباکتری‌ها) مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر آن نقش جلبک‌ها به‌عنوان حسگرهای زیستی برای شناسایی آلاینده‌های زیست‌محیطی و بسته‌بندی‌های هوشمند مواد غذایی در جوانب مختلف مورد بررسی قرار گرفت.

References

1. Afreen, R., Tyagi, S., Singh, G.P., & Singh, M. (2021). Challenges and perspectives of polyhydroxyalkanoate production from microalgae/cyanobacteria and bacteria as microbial factories: an assessment of hybrid biological system. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, *9*, 624885. https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.624885
2. Allouzi, M.M.A., Allouzi, S., Al-Salaheen, B., Khoo, K.S., Rajendran, S., Sankaran, R., & Show, P.L. (2022). Current advances and future trend of nanotechnology as microalgae-based biosensor. *Biochemical Engineering Journal*, *187*, 108653. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2012.01.002
3. Altamirano, M., Garcıa-Villada, L., Agrelo, M., Sánchez-Martın, L., Martın-Otero, L., Flores-Moya, A., & Costas, E. (2004). A novel approach to improve specificity of algal biosensors using wild-type and resistant mutants: an application to detect TNT. *Biosensors and bioelectronics*, *19*(10), 1319-1323. https://doi.org/10.1016/j.toxicon.2013.10.003
4. Antonacci, A., & Scognamiglio, V. (2020). Biotechnological advances in the design of algae-based biosensors. *Trends in Biotechnology*, *38*(3), 334-347. https://doi.org/10.3329/bjb.v42i2.18033
5. Aydınoğlu, D. (2020). Active food packaging technology as an application in the food industry. *Academic Studies in Engineering Sciences*, 215. https://doi.org/10.21123/bsj.15.1.16-21
6. Azman, N.H., Khairul, W.M., & Sarbon, N.M. (2022). A comprehensive review on biocompatible film sensor containing natural extract: Active/intelligent food packaging. *Food Control*, *141*, 109189. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109189

7. Bao, Z., Weatherspoon, M. R., Shian, S., Cai, Y., Graham, P.D., Allan, S.M., & Kang, Z. (2007). Chemical reduction of three-dimensional silica micro-assemblies into microporous silicon replicas. *Nature*, *446*(7132), 172-175. https://doi.org/10.1016/j.toxicon.2011.02.015
8. Brayner, R., Couté, A., Livage, J., Perrette, C., & Sicard, C. (2011a). Micro-algal biosensors. *Analytical and Bioanalytical Chemistry, 401*, 581-597. https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2015.11.002
9. Brayner, R., Couté, A., Livage, J., Perrette, C., & Sicard, C. (2011b). Micro-algal biosensors. *Analytical and Bioanalytical Chemistry, 401*(2), 581-597. https://doi.org/10.1007/s00216-011-5107-z
10. Carrilho, E.N.V., Nóbrega, J.A., & Gilbert, T.R. (2003). The use of silica-immobilized brown alga (*Pilayella littoralis*) for metal preconcentration and determination by inductively coupled plasma optical emission spectrometry. *Talanta, 60*(6), 1131-1140. https://doi.org/10.1016/j.toxicon.2007.09.001
11. Chen, J., Ren, Y., Seow, J., Liu, T., Bang, W., & Yuk, H. (2012). Intervention technologies for ensuring microbiological safety of meat: current and future trends. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 11*(2), 119-132. https://doi.org/10.1016/j.algal.2014.12.009
12. Chouteau, C., Dzyadevych, S., Chovelon, J.-M., & Durrieu, C. (2004). Development of novel conductometric biosensors based on immobilised whole cell *Chlorella vulgaris* microalgae. *Biosensors and Bioelectronics, 19*(9), 1089-1096. https://doi.org/10.3390/md9112164
13. Coste, M., Boutry, S., Tison-Rosebery, J., & Delmas, F. (2009). Improvements of the Biological Diatom Index (BDI): Description and efficiency of the new version (BDI-2006). *Ecological Indicators, 9*(4), 621-650. https://doi.org/10.1126/science.1099128
14. De, P., & Mazumder, N. (2022a). Diatoms as sensors and their applications. In *Diatom Microscopy* (pp. 251-281). https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.104
15. De, P., & Mazumder, N. (2022b). Diatoms as sensors and their applications. *Diatom Microscopy*, 251-281. https://doi.org/10.1016/j.hal.2015.10.015
16. De Stefano, L., Rendina, I., De Stefano, M., Bismuto, A., & Maddalena, P. (2005a). Marine diatoms as optical chemical sensors. *Applied Physics Letters, 87*(23). https://doi.org/10.1111/pbi.12638
17. De Stefano, L., Rendina, I., De Stefano, M., Bismuto, A., & Maddalena, P. (2005b). Marine diatoms as optical chemical sensors. *Applied Physics Letters, 87*(23), 233902. https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01693
18. Durrieu, C., Badreddine, I., & Daix, C. (2003). A dialysis system with phytoplankton for monitoring chemical pollution in freshwater ecosystems by alkaline phosphatase assay. *Journal of Applied Phycology, 15*, 289-295. https://doi.org/10.1021/np500106w
19. Durrieu, C., & Tran-Minh, C. (2002). Optical algal biosensor using alkaline phosphatase for determination of heavy metals. *Ecotoxicology and Environmental Safety, 51*(3), 206-209. https://doi.org/10.1016/j.hal.2010.12.002
20. Ejeian, F., Etedali, P., Mansouri-Tehrani, H.-A., Soozanipour, A., Low, Z.-X., Asadnia, M., & Razmjou, A. (2018). Biosensors for wastewater monitoring: A review. *Biosensors and Bioelectronics, 118*, 66-79. https://doi.org/10.1016/j.bios.2018.07.019
21. Giardi, M.T., & Pace, E. (2005). Photosynthetic proteins for technological applications. *TRENDS in Biotechnology, 23*(5), 257-263. https://doi.org/10.1016/j.febslet.2012.07.026
22. Giere, O. (2008). *Meiobenthology: the microscopic motile fauna of aquatic sediments*: Springer Science & Business Media. https://doi.org/10.3390/toxins11110624
23. Guedri, H., & Durrieu, C. (2008). A self-assembled monolayers based conductometric algal whole cell biosensor for water monitoring. *Microchimica Acta, 163*, 179-184. https://doi.org/10.1186/s40529-017-0211-9
24. Halonen, N., Pálvölgyi, P.S., Bassani, A., Fiorentini, C., Nair, R., Spigno, G., & Kordas, K. (2020). Bio-based smart materials for food packaging and sensors – A Review. *Frontiers in Materials, 7*. https://doi.org/10.3389/fmats.2020.00082
25. Hemavathi, A., & Siddaramaiah, H. (2018). *Food packaging: polimers as packaging materials in food supply chains.* Encyclopedia of polymer applications. CRC Press Boca Raton, 1374-1397. https://doi.org/10.1080/03650340.2010.499902
26. Ladero, V., Calles-Enríquez, M., Fernández, M., & A Alvarez, M. (2010). Toxicological effects of dietary biogenic amines. *Current Nutrition & Food Science, 6*(2), 145-156. https://doi.org/10.3390/md11103689
27. Lin, K.-C., Kunduru, V., Bothara, M., Rege, K., Prasad, S., & Ramakrishna, B. (2010). Biogenic nanoporous silica-based sensor for enhanced electrochemical detection of cardiovascular biomarkers proteins. *Biosensors and Bioelectronics, 25*(10), 2336-2342. https://doi.org/10.1007/s11104-008-9734-x
28. Liu, Q., & Wang, P. (2009). *Cell-based biosensors: principles and applications*: Artech House. https://doi.org/10.1016/j.jplph.2010.09.013
29. Mallick, N. (2002). Biotechnological potential of immobilized algae for wastewater N, P and metal removal: a review. *Biometals, 15*, 377-390. https://doi.org/10.1007/s11356-013-1535-y

30. Mazumder, N., & Gordon, R. (2022). *Diatom Microscopy*: John Wiley & Sons. https://doi.org/10.3109/10408410902823705
31. Monique, E. (2015). Volatile amines as criteria for chemical quality assessment. In. https://doi.org/10.1007/s11356-016-6223-2
32. Moreno-Garrido, I. (2008). Microalgae immobilization: current techniques and uses. *Bioresource Technology, 99*(10), 3949-3964. https://doi.org/10.1016/S0041-0101(98)00114-7
33. Nassif, N., & Livage, J. (2011). From diatoms to silica-based biohybrids. *Chemical Society Reviews, 40*(2), 849-859. https://doi.org/10.1006/abio.1995.1106
34. Okuma, H., Okazaki, W., Usami, R., & Horikoshi, K. (2000). Development of the enzyme reactor system with an amperometric detection and application to estimation of the incipient stage of spoilage of chicken. *Analytica Chimica Acta, 411*(1-2), 37-43. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.01.107
35. Park, Y.W., Kim, S.M., Lee, J.Y., & Jang, W. (2015). Application of biosensors in smart packaging. *Molecular & Cellular Toxicology, 11*, 277-285. https://doi.org/10.1007/BF01874863
36. Pavelková, A. (2013). Time temperature indicators as devices intelligent packaging. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis, 61*(1), 245-251. https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2006.11.001
37. Peña-Vázquez, E., Pérez-Conde, C., Costas, E., & Moreno-Bondi, M. (2010). Development of a microalgal PAM test method for Cu (II) in waters: comparison of using spectrofluorometry. *Ecotoxicology, 19*, 1059-1065. https://doi.org/10.4489/MYCO.2006.34.3.138
38. Pospíšil, P. (2009). Production of reactive oxygen species by photosystem II. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics, 1787*(10), 1151-1160. https://doi.org/10.1016/j.bbabio.2009.05.005
39. Poyatos-Racionero, E., Ros-Lis, J.V., Vivancos, J.-L., & Martínez-Máñez, R. (2018). Recent advances on intelligent packaging as tools to reduce food waste. *Journal of Cleaner Production, 172*, 3398-3409. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.075
40. Punakivi, K., Smolander, M., Niku-Paavola, M.-L., Mattinen, J., & Buchert, J. (2006). Enzymatic determination of biogenic amines with transglutaminase. *Talanta, 68*(3), 1040-1045. https://doi.org/10.4489/MYCO.2008.36.4.242
41. Purohit, B., Vernekar, P. R., Shetti, N. P., & Chandra, P. (2020). Biosensor nanoengineering: Design, operation, and implementation for biomolecular analysis. *Sensors International, 1*, 100040. https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.04.004
42. Rahman, M.A., Soumya, K., Tripathi, A., Sundaram, S., Singh, S., & Gupta, A. (2011). Evaluation and sensitivity of cyanobacteria, Nostoc muscorum and Synechococcus PCC 7942 for heavy metals stress–a step toward biosensor. *Toxicological & Environmental Chemistry, 93*(10), 1982-1990. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.04.037
43. Rathnayake, I., Munagamage, T., Pathirathne, A., & Megharaj, M. (2021). Whole cell microalgal-cyanobacterial array biosensor for monitoring Cd, Cr and Zn in aquatic systems. *Water Science and Technology, 84*(7), 1579-1593. https://doi.org/10.1139/W08-034.
44. Reynolds, C.S. (2006). *The ecology of phytoplankton*: Cambridge University Press. https://doi.org/10.30493/DAS.2020.246624
45. Roberta, B., Alain, C., Jacques, L., Catherine, P., & Clemence, S. (2011). Micro-algal biosensors. *Analytical and Bioanalytical Chemistry, 401*(2), 581-598. https://doi.org/10.30493/DAS.2020.246624.
46. Rodriguez Jr, M., Sanders, C. A., & Greenbaum, E. (2002). Biosensors for rapid monitoring of primary-source drinking water using naturally occurring photosynthesis. *Biosensors and Bioelectronics, 17*(10), 843-849. https://doi.org/10.1111/jpy.120
47. Sandhage, K. H., Allan, S. M., Dickerson, M. B., Gaddis, C. S., Shian, S., Weatherspoon, M. R., & Snyder, R. L. (2005). Merging biological self-assembly with synthetic chemical tailoring: The Potential for 3-D Genetically Engineered Micro/Nano-Devices (3-D GEMS). *International Journal of Applied Ceramic Technology, 2*(4), 317-326. https://doi.org/10.1007/s10295-010-0833-3
48. Saraswati, P.K., & Srinivasan, M. (2015). *Micropaleontology: Principles and applications*: Springer. https://doi.org/10.3923/ajps.2003.944.951
49. Shao, C., Howe, C., Porter, A.J.R., & Glover, L. (2002). Novel cyanobacterial biosensor for detection of herbicides. *Applied and Environmental Microbiology, 68*(10), 5026-5033. https://doi.org/10.1007/s10265-006-0057-9
50. Shitanda, I., Takada, K., Sakai, Y., & Tatsuma, T. (2005). Compact amperometric algal biosensors for the evaluation of water toxicity. *Analytica Chimica Acta, 530*(2), 191-197. https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2013.04.007
51. Sobhan, A., Muthukumarappan, K., & Wei, L. (2021). Biosensors and biopolymer-based nanocomposites for smart food packaging: Challenges and opportunities. *Food Packaging and Shelf Life, 30*, 100745. https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100745

52. Tajes-Martinez, P., Beceiro-Gonzalez, E., Muniategui-Lorenzo, S., & Prada-Rodriguez, D. (2006). Micro-columns packed with *Chlorella vulgaris* immobilised on silica gel for mercury speciation. *Talanta*, *68*(5), 1489-1496. https://doi.org/10.1016/j.jgeb.2013.04.001.
53. Védrine, C., Leclerc, J.-C., Durrieu, C., & Tran-Minh, C. (2003). Optical whole-cell biosensor using *Chlorella vulgaris* designed for monitoring herbicides. *Biosensors and Bioelectronics, 18*(4), 457-463. https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a084742.
54. Verma, N., Kaur, H., & Kumar, S. (2011). Whole cell based electrochemical biosensor for monitoring lead ions in milk. *Biotechnology, 10*(3), 259-266. https://doi.org/10.3390/app11020871
55. Wadhera, T., Kakkar, D., Wadhwa, G., & Raj, B. (2019). Recent advances and progress in development of the field effect transistor biosensor: A review. *Journal of Electronic Materials, 48*, 7635-7646. https://doi.org/10.1007/s11099-017-0716-1
56. Yam, K.L., Takhistov, P.T., & Miltz, J. (2005). Intelligent packaging: concepts and applications. *Journal of Food Science*, *70*(1), R1-R10. https://doi.org/10.1007/s11274-019-2653-6
57. Zamaleeva, A.I., Sharipova, I.R., Shamagsumova, R.V., Ivanov, A.N., Evtugyn, G.A., Ishmuchametova, D.G., & Fakhrullin, R.F. (2011). A whole-cell amperometric herbicide biosensor based on magnetically functionalised microalgae and screen-printed electrodes. *Analytical Methods, 3*(3), 509-513. https://doi.org/10.1016/j.fob.2011.10.004